

論文 Article

穴加工におけるドリル変形機構の解析

原稿受付 2012 年 3 月 29 日

ものづくり大学紀要 第 3 号 (2012) 18~22

藤澤政泰^{*1}, 高田光士郎^{*2}^{*1} ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科^{*2} ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科学学生

Analysis of Drill Deformation Mechanism in Hole Machining

Masayasu FUJISAWA ^{*1}, Kojirou TAKADA ^{*2}^{*1} Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} Student of Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists

Abstract

The drilling has been accurate to a precision of a few microns, because drill material and form has been advanced. However a essential reason of hole deflection in drilling has not been well known. So in this paper, a effect of drill vibration on hole deflection was analyzed. As a result, the error of initial position of drill was caused by regenerative chatter vibration, and deflection of hole was caused by 90 degree phase shift of drill bending vibration after one rotation.

Key Words : drilling accuracy, regenerative vibration, hole deflection, drill deflection

1. はじめに

ドリル加工は最も幅広く使われている機械加工法であり、ドリル材質はもちろん工具形状に関しても新しい製品が次々と発表され、微小径ドリルの折損防止技術も進んでいる^{1)~3)}。プリント基板⁴⁾や各種ノズルなど、穴加工の微細化や高精度化のニーズに対して、小径ドリルのシニング技術⁵⁾やチップブレーカを備えた小径ドリル⁶⁾が開発され、クーラン穴付きドリルの小径化も進んでいる。これらの技術は切削抵抗を低減することによって穴加工の高精度化を図るものであるが、穴が曲がる根本的な原因の対策にはなっていない。というのはドリルが回転しているため、切削抵抗の分布は軸対称になる。このため切削抵抗の平均値は 0 となり、特定の方向に穴が曲がるとは考え難い。

上記のごとく静的な力でドリルが変形し、穴が

曲がるとは考え難いが、動的な力の影響を受ける可能性が存在する。動的な力、つまり振動が線形で、3 次元の各方向において独立ならば、穴の曲がりに影響することは考えにくい。しかしながら、振動の非線形性やモードカップリングを考慮すれば、振動によって穴が曲がる可能性があると考え、実験をした。

2. 実験装置および方法

図 1 の加工装置を使って表 1 の条件で穴加工をし、図 2 のプローブで穴の位置精度を測定した。ドリルの振動の測定には表 2 の装置を使った。記録計の PC カードに保存した加速度とインパルスを、ExcelVBA の自作プログラムで、フーリエ変換し、その除算した値を振動の特性とした。

Table 1 Drilling equipment and condition

Drilling machine	FANUC α -T14ics
Workpiece	A2060, $50 \times 80 \times 30$ mm
Drill	Tungsten carbide, ϕ 5.3 mm, 2 teeth Mitsubishi VAPDSSUSD0530
Spindle speed	$523 \sim 7600 \text{ min}^{-1}$
Feed rate	0.02 mm/rev
Center hole	Nothing
Guide hole	Nothing
Cutting fluid	Idemitsu Magplus MP5

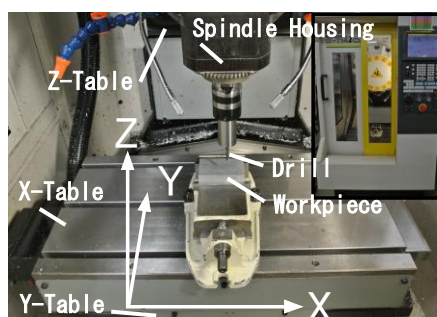


Fig. 1 Drilling machine

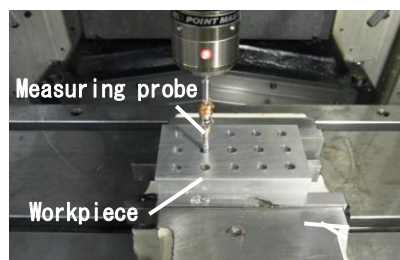


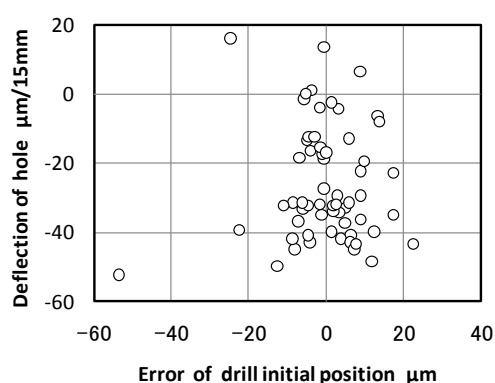
Fig. 2 Measuring probe of hole position

Table 2 Measuring equipment of drill vibration and cutting resistance

Accelerometer	Kistler 8778A500sp
Impulse hammer	Kistler 9722A500
Dynamometer	Kistler 9257B

3. 実験結果

ドリルは回転しているため、特定の方向に曲がることは考えにくいですが、食いつき位置がずれるとドリル側面に抵抗が加わり、ドリルは位置ずれした方向に曲がる⁷⁾。食いつき位置のずれの原因として、ドリル先端と回転中心のずれが考えられる。本実験に使用したドリルの軸心と先端の同心度は数ミクロン以内であり、チャックに取り付けた状態でも回転軸との同心度は $10 \mu\text{m}$ 以内である。とすれば、食いつき時の位置ずれもせいぜい $10 \mu\text{m}$ 程度でなければならないが、実際には $10 \mu\text{m}$ 以上ある。もみつけをしても、食いつき位置が $10 \mu\text{m}$ 以上ずれることがある。これは、位置ずれの原因がドリル先端の同心度だけではないことを意味している。また曲りの原因が食いつき位置のずれであるとすれば、両者の間に相関関係がなければならぬが、**図3**に示すようにばらつきが大きい。これは、食いつき位置のずれ以外にもドリルを曲げるおおきな要因があることを示している。ドリルは回転しているため、XY面内における切削抵抗の平均値は0になると考えられる。したがって、この現象を理解するには動的な要因、すなわち振動を考慮しなければならない。



Spindle speed: $723 \sim 7600 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3 Relation between error of drill initial position and hole deflection

ドリル加工でも再生びり振動が生じることが知られているが⁸⁾、ドリルの曲がりへの影響は報告されていない。ドリル回転数の奇数倍の周波数

で再生びり振動が生じる以外は、旋削における再生びり振動の発生メカニズムとおなじである。

奇数倍の周波数で再生びり振動が生じるのは、2枚刃の場合、ドリル半回転後の曲げ振動が逆位相でなければ、再生効果が生じないためである。図4は、図1の加工装置に取り付けたドリルの振動の周波数特性である。48Hzの振動はZ軸テーブルの固有振動数であり、737Hzは主軸の固有振動数である。1738Hzはドリルの1次モードの曲げ振動の固有振動である。

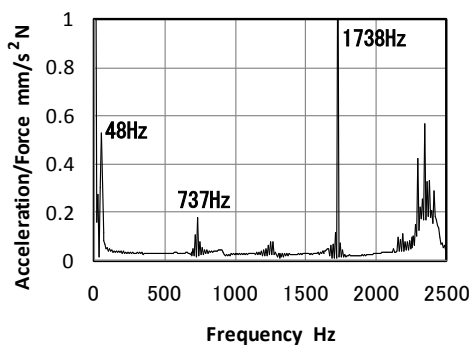


Fig. 4 Frequency character of drill vibration

振動が穴の曲がりに影響する要因として2つ考えられる。ひとつは再生びり振動である。図5はドリル食いつき時のドリルに加わる切削抵抗のXY面内における軌跡である。星型の軌跡になっており、ドリル1回転当り5周期の再生びり振動が生じていることがわかる。

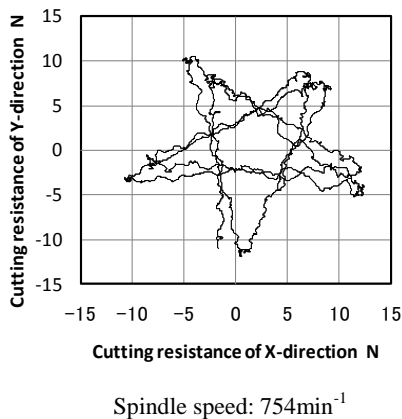


Fig. 5 Trajectory of cutting resistance at initial position

図6は15mmの深さにおける切削抵抗の軌跡で

あり、5角形になっている。これも5周期の振動であるが、振動の振幅は小さくなっている。再生びり振動では1周期毎に位相ずれが生じ、1周期の切削抵抗の積分値が0にならない。

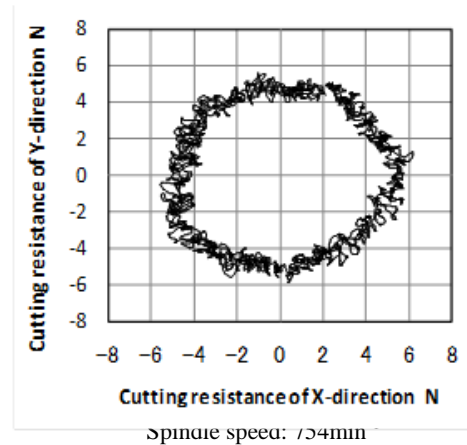


Fig. 6 Trajectory of cutting resistance at 15mm-depth

このため、ドリルを曲げる力の平均値が0にならず、特定の方向に穴が曲がると考えられる。

図7にドリル回転数と穴の曲がりの関係を示す。曲がりの正負は図1の加工装置の座標の正負にしたがっている。回転数と曲がりの間に明確な相関関係がないことわかる。

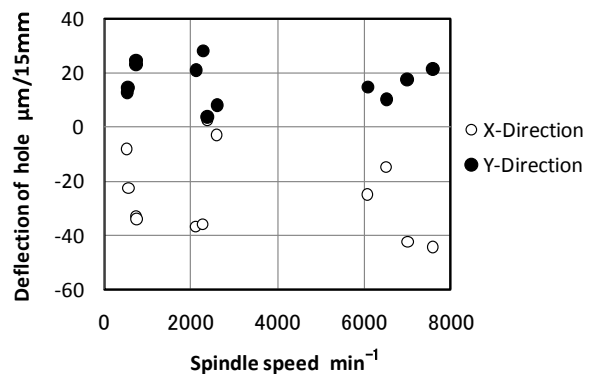


Fig. 7 Relation between spindle speed and hole reflection

しかし図8に示すように、ドリル曲げ振動の1回転後の位相差と曲がりの間に相関関係があり、位相差が90度のとき曲がりが最大になり、0度と180度で小さくなっている。位相差はドリル回転数と曲げ振動の固有振動数で定まる値であり、入力値である。これにたいして、穴の曲

がりは入力に対する結果である。本実験はドリル回転数だけを変化させており、他の実験条件は表1の通り、一定である。またドリル回転数の変化に伴う図4の各種固有振動との位相ずれは、ドリルの曲げ振動以外、相関関係が認められない。したがって、ドリルの曲げ振動が穴の曲がりに大きく影響していると推定される。

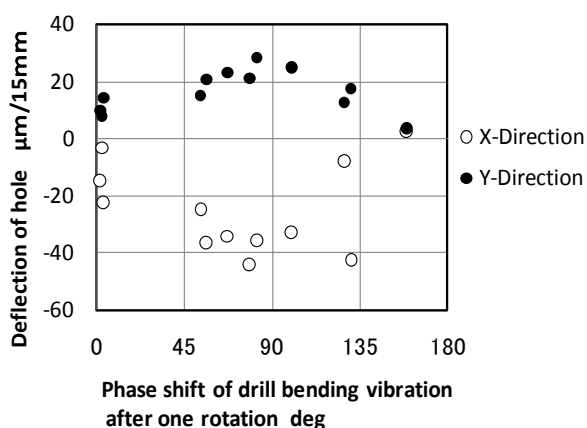


Fig. 8 Relation between hole reflection and phase shift of drill bending vibration after one rotation

もうひとつのドリルを曲げる原因は、XY方向の振動のモードカップリングや非線形性にあると考えられる。図9はドリルにインパルス力付加直後の振動加速度の軌跡である。

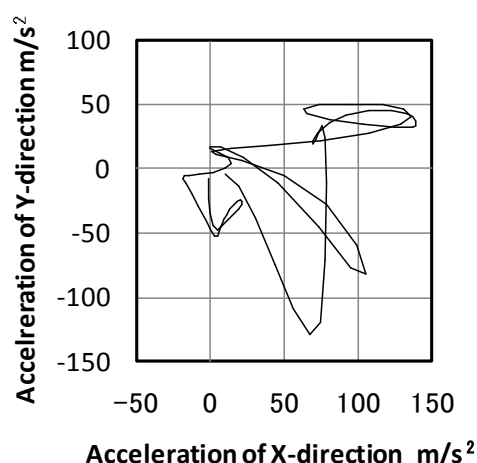


Fig. 9 Trajectory of drill acceleration at impact with impulse hammer

X方向に加振しているにもかかわらずY方向に動いたりし、斜め方向の振動が目立つ。これは振動のモードカップリングと非線形性に起因し

ており、特定の方向に振動しやすいことと、振動が非対称であることを示している。図10はドリルにインパルス力を加えた後、5~10ms後のXY座標上の加速度の軌跡である。加振方向に拘わらず、一定の方向に振動していることがわかる。これはモードコンプライアンスの影響で特定の方向の振動が残留していることを示している。

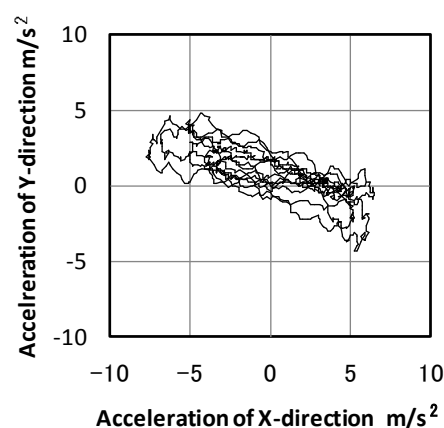


Fig. 10 Trajectory of drill acceleration at 5~10ms after impact with impulse hammer

ドリルの食い付き位置と深さ15mmにおける穴位置誤差のXY座標を図11に示す。

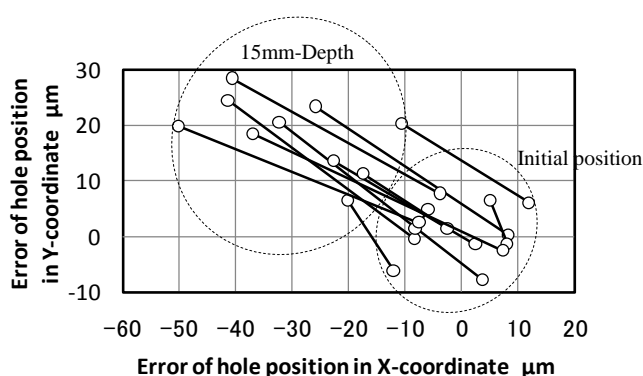


Fig. 11 Error of drill position at initial point and 15mm-depth

右下の点が食い付き位置の誤差で、左上の座標が深さ15mmにおける誤差である。左上に向かって曲がっており、図9、図10の振動方向とおおよそ一致している。

この結果より、振動が穴の曲がりに影響して

いると推定され、これを抑制するには再生びり振動を回避し、主軸、テーブルおよび軸受けの動剛性を大きくするとともに、剛性を等方的にすることが有効と考えられる。

4. おわりに

穴加工におけるドリルの変形機構を解析した結果、下記のことが分かった。

- (1) ドリルの食込み位置のずれ量と穴の曲がりの間の相関関係は小さい。
- (2) ドリルの振動に非線形性とモードカップリングが存在する。
- (3) ドリル食込み位置ずれは、再生びり振動の影響が大きいと推定される。
- (4) ドリルの曲げ振動の1回転後の位相ずれと穴の曲がりの間に相関関係があり、90度の位相ずれで、曲がりが最も大きくなり、0度と180度の位相ずれで穴の曲がりは最小になる。

本研究における「動的な力による穴の曲がりの発生機構」は、定量化されたわけではないが、従来、全く顧みられてない機構であり、今後定量化が進

むと考えている。また本研究では予想だになかった現象も見出されたが、その詳細は別稿にて述べる。

文 献

- 1) 小口敏孝：力センサ内蔵旋盤型微細穴加工機の開発，平成15年度新機械振興賞概要，（2003）
- 2) 寺林隆夫，大幸洋一，前田幸雄，梶田正美：プリント基板の小径ドリル加工(第4報)，精密工学会誌，68，4(2002) 556-560
- 3) 小池昌弘，高橋直紀：プリント基板用微小径ドリルのための微小トルクセンサ開発とトルク測定，日本機械学会北信越支部第46期総会・講演会講演論文集，（2009）311
- 4) 田中康稔：PWB用超精密微細穴あけ加工機の位置決め技術，機械設計，48，12（2004）35-39
- 5) 南部洋平，落合一裕，秋葉大輔，永久保輝昭，松田信一：Co基超耐熱合金への微細深穴加工に関する研究，精密工学会誌，75，9（2009）1083-1087
- 6) 赤松猛史，吉村彰，木野晴喜：微細超深穴加工用ドリル「エボックマイクロステップボーラー」の開発，砥粒加工学会學術講演会講演論文集，（2010）419-422
- 7) 佐久間敬三，田口紘一，甲木昭雄：深穴加工における穴の曲がり(第1報)，精密機械，49，10（1983）1379-1384
- 8) 藤井洋，丸井悦男，江馬論：ドリルのびり振動発生機構，機械学会論文集，51，462（1985）436-445